

doi: 10.3788/gzxb20144305.0523002

四环谐振腔结构中耦合诱导透明特性研究

崔丹凤^{a,b}, 谢成峰^a, 刘耀英^b, 李艳娜^b, 韦丽萍^a, 王永华^b,
刘俊^{a,b}, 薛晨阳^{a,b}

(中北大学 a. 仪器科学与动态测试教育部重点实验室; b. 电子测试技术重点实验室, 太原 030051)

摘要:基于量子相干效应中的电磁诱导透明,设计了一种四环级联谐振腔结构,并对其产生的耦合诱导透明现象进行了理论分析.利用时域有限差分法和束传输法对结构的关键参量进行了仿真模拟,采用电子束光刻与感应耦合等离子刻蚀工艺相结合的方式完成了结构的加工制备.实验中利用垂直光栅耦合法对结构进行测试,测试结果表明:由于相消干涉,该结构可以引起一个狭窄的透明峰;每个环形腔之间相互干涉,产生了两个透射峰,从而实现对光传输的延迟,其中一个透射谱半高全宽为 0.022 nm,对应的品质因数为 0.72×10^5 ,且两个谐振峰之间的距离相隔 0.084 nm.波导直通端与下载端的谐振谱线吻合,与理论分析相符.

关键词:光波导;色散;谐振诱导透明;四阶环形腔结构;品质因数

中图分类号: TN256

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2014)05-0523002-6

Research on Coupled Resonator Induced Transparency in Fourth-order Microring Resonator

CUI Dan-feng^{a,b}, XIE Cheng-feng^a, LIU Yao-ying^b, LI Yan-na^b,
WEI Li-ping^a, WANG Yong-hua^b, LIU Jun^{a,b}, XUE Chen-yang^{a,b}

(a. Key Laboratory of Instrumentation Science & Dynamic Measurement, Ministry of Education; b. Science and Technology on Electronic Test & Measurement Laboratory, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: A fourth-order microring resonator structure was designed based on quantum coherence effects of electromagnetic induced transparency. Coupled-resonator-induced-transparency phenomenon which produced in resonator was analyzed theoretically. Key parameters of structures were simulated by Finite Difference Time Domain Method and Beam Propagation Method. The ring resonators were fabricated with electron beam lithography and the induction coupled plasma etching process. The structure was tested by vertical grating coupling method, the results show that a narrow transparent peak was obtained which is caused by interference due to phase elimination. Optical transmission delay is realized by two transmission peaks which are generated from mutual interference among ring resonators and one of the transmission spectrum full width at half maximum is 0.022 nm. This structure can achieve high quality factor ($Q=0.72 \times 10^5$), and the distance between the two resonance peaks separated by 0.084 nm. The through port and drop port transmission spectra are coincided well with each other which excellent agree with the theoretical analysis.

Key words: Optical waveguide; Dispersion; Coupled-Resonator-Induced-Transparency (CRIT); Fourth-order ring resonator; Quality factor (Q)

OCIS Codes: 230.4555; 140.4780; 130.0130

0 引言

类似于量子相干效应中的电磁诱导透明 (Electromagnetically Induced Transparency, EIT)^[1], 谐振

腔之间的相消干涉可以实现谐振耦合诱导透明效应 (Coupled Resonator Induced Transparency, CRIT), 耦合微环谐振腔作为一种色散结构^[2-3], 能够改变光在介质中的群速度, 从而在较宽的低透射率通带内出现一个

基金项目: 国家自然科学基金重点支持项目 (No. 91123036) 和国家自然科学基金杰出青年基金项目 (No. 51225504) 资助

第一作者: 崔丹凤 (1987-), 女, 博士研究生, 主要研究方向为光波导分立器件. Email: cuidanfeng_cdf@126.com

导师 (通讯作者): 薛晨阳 (1971-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为纳机电器件 MEMS 器件及系统. Email: xuechenyang@nuc.edu.cn

收稿日期: 2014-02-17; 录用日期: 2014-04-03

<http://www.photon.ac.cn>

较窄的透明峰^[4]. 这种方法依赖色散结构的光学共振特性使群速度减慢, 比基于色散介质获得光速减慢的方法具有较低的条件要求, 更易于在实际中应用.

2004年, David D. Smith 等人对照电磁诱导透明, 利用串联微环谐振器结构实现了耦合诱导透明现象. 2006年, Q. Xu 等人在实验中得到了并联双环谐振腔结构的光速减慢, 实验结果表明最大的延迟可达 25 ps. 2007年, K. Totsuka 等人在双微球结构中观测到了慢光现象. 由微环谐振腔引起的耦合谐振诱导透明效应的器件具有体积小、结构易于设计、室温下的集成芯片式结构便于相干操控光场、透明窗口可由微腔中心频率确定和不需要强激光驱动等优点, 被广泛应用于全光开关^[6-7]、光学延迟线^[8-9]、光学陀螺^[10-13]、调制器^[14-15]、光存储等方面.

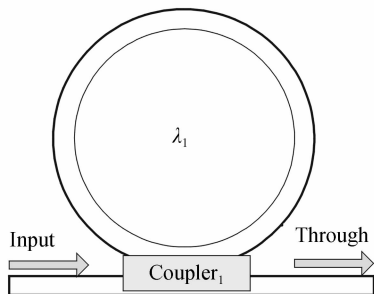
目前, 利用微环谐振腔获得耦合诱导透明效应的方法主要有两种: 一种是通过控制光学谐振腔来降低其光学回路间的共振干扰, 如精确控制耦合级联谐振腔之间的周长差^[5]; 另一种是利用相同的谐振微腔, 通过改变微腔之间的耦合强度和微腔损耗得到. 而要精确控制谐振腔的周长差对结构设计及制备工艺有很高的要求. 本文设计了一种新型四环谐振腔与两个直波导组成的耦合谐振结构, 它相比于其他级联结构不需要精确计算各个谐振腔之间的周长差, 能够极大地降低设计和制备的难度. 同时, 该结构能够在获得高品质因数的基础上延迟光的传输时间.

1 理论分析

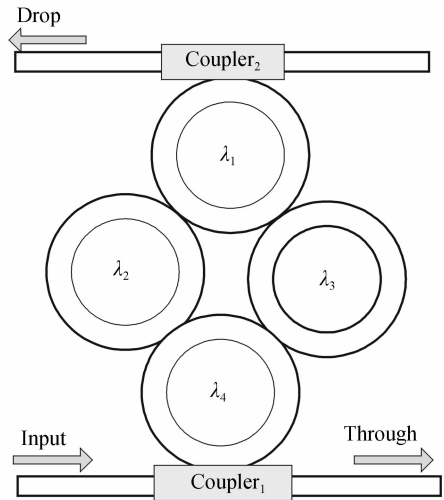
四环谐振腔结构与单环谐振腔结构的对比如图 1. 光波由下直波导输入端输入, 经耦合器 1, 一部分能量的光耦合进入环形波导, 经过耦合器 2, 将一部分能量的光由下载端输出. 而环内剩余另一部分能量的光又经耦合器 1 由直通端输出. 四环谐振腔结构每个环形腔具有相同的半径, 且其中心谐振波长分别为 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 和 λ_4 . 理论上, 由于结构的对称性以及环形腔之间的相互作用诱导谐振波长的偏移, 使得 $\lambda_1 = \lambda_4 < \lambda_2 = \lambda_3$.

根据耦合模式理论^[16], 单环微腔结构在谐振 (即 $\varphi = 2k\pi$) 时吸收达到最大, 其光强透射率为

$$T = \left| \frac{t - a \exp(i\varphi)}{1 - ta \exp(i\varphi)} \right|^2 \quad (1)$$



(a) Single microring resonator



(b) Fourth-order microring resonator

图 1 微环谐振腔

Fig. 1 Schematic drawing of microring resonator 相应的有效相移为

$$\varphi_i^{eff} = \arctan \left[\frac{-a(1-t^2) \sin \varphi}{t(1+a^2) - a(1+t^2) \cos \varphi} \right] \quad (2)$$

式中 $t, a_N = \exp(-\alpha L)$, $\varphi = 2\pi nL/\lambda$, α, L 分别为环与直波导的透射系数, 环形腔 N 的传递系数, 光波在微环中传输一周后的相移, 吸收系数以及周长. i 表示交叉耦合会附加 $\pi/2$ 的相移.

四环谐振微腔结构的吸收峰由于腔与腔之间的相干耦合而分裂成两个, 且吸收在谐振时达到最小, 从而在两个分裂峰间出现了一个窄的透明峰, 如图 2(a). 四环谐振腔结构的传输函数为

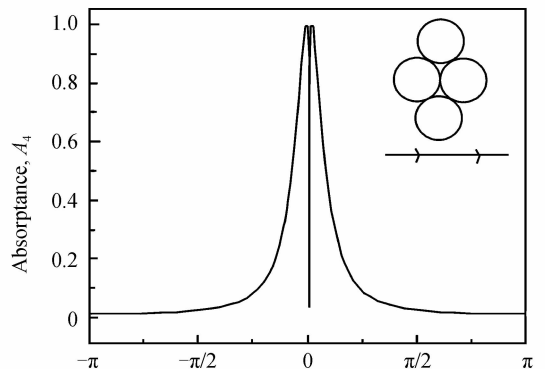
$$\tau_4 = \frac{t_4 - a_4 \tau_3 \exp(i\varphi_4)}{1 - t_4 a_4 \tau_3 \exp(i\varphi_4)} \quad (3)$$

故其透射率和代表整个结构色散情况的有效相移分别为

$$T = |\tau_4|^2 = \left| \frac{t_4 - a_4 \tau_3 \exp(i\varphi_4)}{1 - t_4 a_4 \tau_3 \exp(i\varphi_4)} \right|^2 \quad (4)$$

$$\varphi_4^{eff} = \arctan \left[\frac{-a_4(1-t_4^2) |\tau_3| \sin(\varphi_4 + \varphi_3^{eff})}{t_4(1+a_4^2 |\tau_3|^2) - a_4 |\tau_3| (1+t_4^2) \cos(\varphi_4 + \varphi_3^{eff})} \right] \quad (5)$$

图 2(b) 为整个结构的相移 φ 与有效相移 φ_i^{eff} 之间的关系, φ_1^{eff} 和 φ_4^{eff} 分别表示单环、四环谐振腔结构的有



(a) Absorption against phase shift

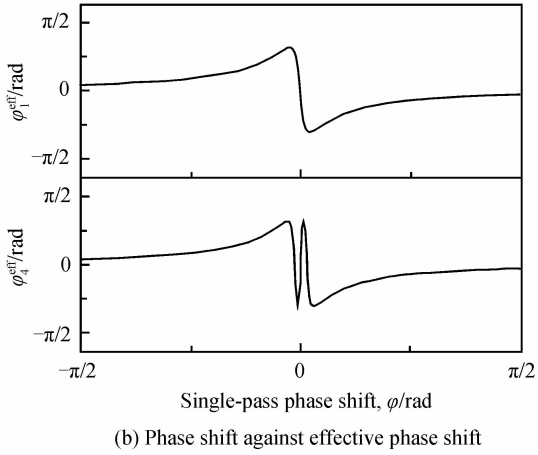


图2 四环结构吸收、相移及有效相移的关系曲线
Fig. 2 Relationship among absorption, phase and effective phase shift for four-ring resonator

效相移. 从图中可以看出, 单环在谐振区域内出现反常色散, 而经过四环腔相互作用后, 在谐振区域出现了很陡的正常色散, 这种正常色散导致了光速在整个结构中减慢. 此时光脉冲的群时延为

$$\tau(\omega) = d\varphi^{\text{eff}}/d\omega \quad (6)$$

相对应的群速度为

$$v_g = L/\tau(\omega) \quad (7)$$

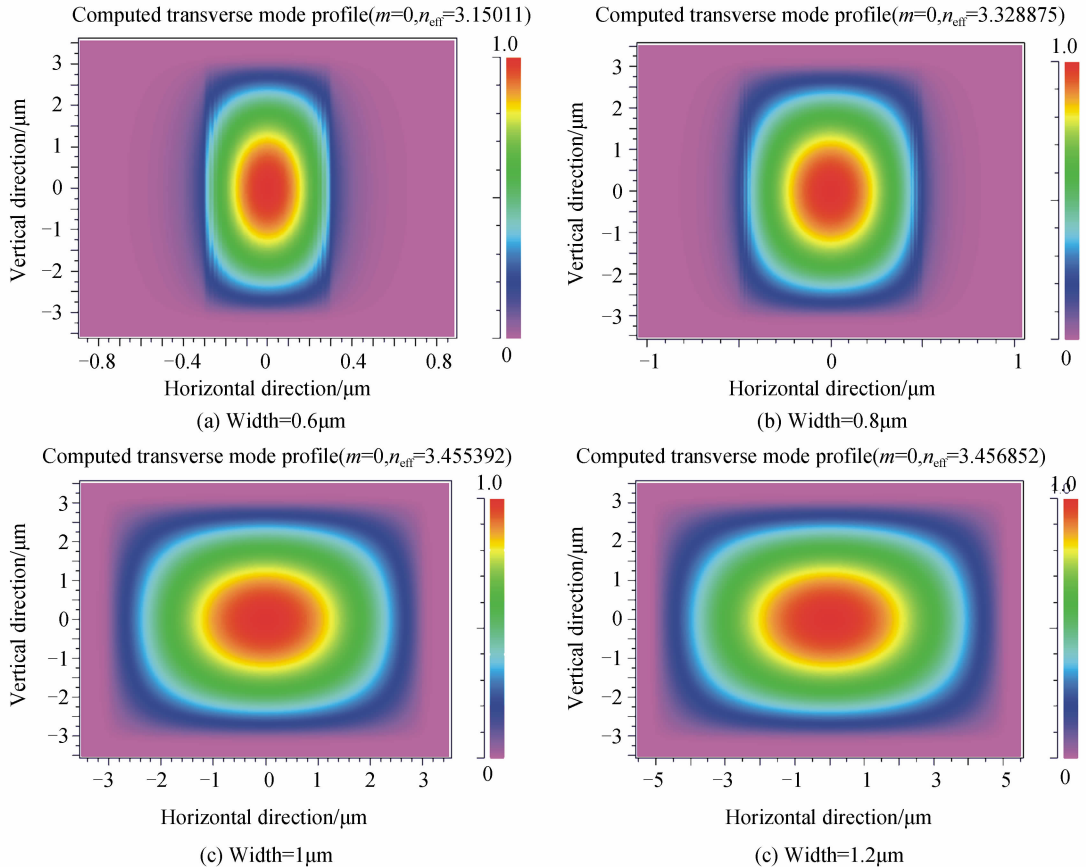


图3 有效折射率与波导宽度变化关系图
Fig. 3 Effective refractive index against waveguide width

式中 ω, n_0 分别为光波频率和结构介质折射率. 从而得到整个结构的群折射率为

$$n_g = n_0 \frac{d\varphi^{\text{eff}}}{d\varphi} \quad (8)$$

2 设计与制备

由于绝缘体上硅 (Silicon-On-Insulator, SOI) 材料^[17] 的稳定性好, 便于集成, 因此选择了顶层硅为 220 nm, 掩膜层厚度为 3 μm 的 SOI 基片进行加工制备, 在制备之前对不同结构参量的环形腔进行模拟仿真.

有效折射率是影响环形谐振器特性的重要因素, 利用时域有限差分法 (Finite Difference Time Domain, FDTD) 和束传输法 (Beam Propagation Method, BPM) 对 1 550 nm 波长段的波导宽度与有效折射率进行模拟仿真, 其关系曲线如图 3. 当波导宽度小于 600 nm 时, 波导传输属于单模模式, 能够有效减小传输损耗. 随着硅基光波导宽度的增加, 有效折射率随之增大. 同时, 光场倏逝波的强度和波导宽度成反比例关系, 随着光波导宽度的增大, 倏逝波减弱, 不利于直波导与环形谐振腔的近场耦合.

在对波导宽度与环形谐振腔谐振曲线关系模拟仿真时,考虑到计算机的仿真运行空间及速度,选取环形腔半径为 $2.5 \mu\text{m}$,直波导与环形谐振腔之间的耦合间距为 $0.1 \mu\text{m}$.表 1 是不同波导宽度所对应的损耗和品质因数(Q).

表 1 不同波导宽度对应的散射损耗及品质因数

Table 1 Loss and quality factor in different waveguides

Width/nm	400	450	500	550
Loss/(dB · mm ⁻¹)	313	131	7.51	4.50.5
Quality factor	3 000	7 000	12 000	20 000

弯曲波导^[18]的有效折射率不仅与波导宽度成正比,同时与弯曲半径的大小也有密切关系.利用 BPM 方法得到有效折射率与弯曲半径的关系曲线,如图 4.

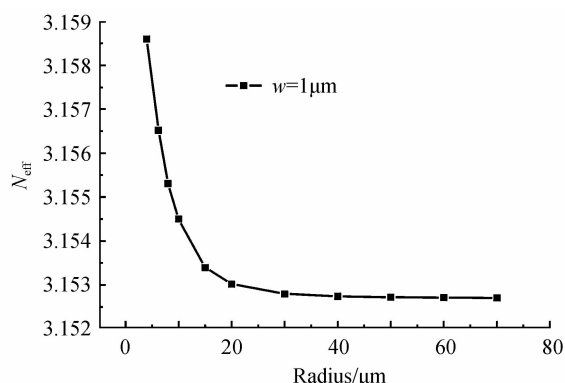


图 4 有效折射率与弯曲半径变化关系图

Fig. 4 Effective refractive index against bending radius

从图中可以看出随着弯曲半径的增大,有效折射率随之减小.由于在常耦合的假设下,耦合波方程表示为

$$\frac{dA_1(z)}{dz} = -j\beta A_1(z) + j\alpha A_2(z) \quad (9)$$

$$\frac{dA_2(z)}{dz} = -j\beta A_2(z) + j\alpha A_1(z) \quad (10)$$

式中 $A_1(z)$ 、 $A_2(z)$ 分别表示两波导归一化光场复振幅, α 表示耦合系数, β 表示传输常量, z 表示沿耦合长度的坐标.可得

$$A_1(z) = \cos \alpha z e^{-j\beta z} \quad (11)$$

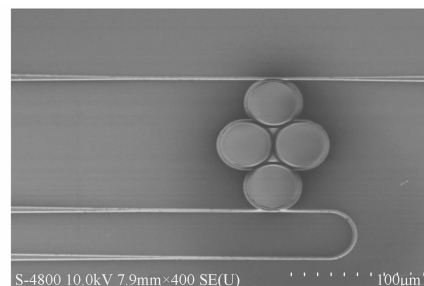
$$A_2(z) = j \sin \alpha z e^{-j\beta z} \quad (12)$$

可以看出,输出相位差与输出功率比(或者耦合比)没有关系,相位差恒为 $\pi/2$ ^[19].也就是说不同半径的圆具有不同的周长,但是具有相同的相位差,因此有效折射率会随着半径的变化而变化.

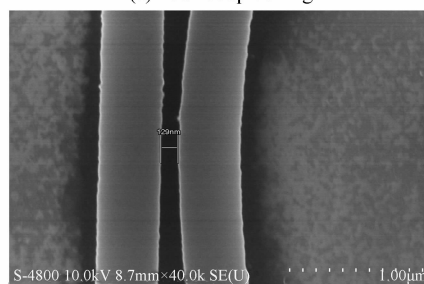
因此,综合理论和工艺上的考虑,选择波导宽度为 500 nm ,环形腔半径为 $20 \mu\text{m}$ 来提高直波导与环形腔的近场耦合,并且有效地降低环形腔的弯曲损耗.在加工制备过程中,为了获得纳米级线条图形,采用 100 kV 的电子束光刻系统的曝光工艺与感应耦合等离子刻蚀技术相结合的制备方法.电子束曝光技术不仅具有超高的分辨率,还可以直接将会聚的电子束斑打在表面

涂有光刻胶的衬底上,而不需要像普通光刻工艺中需要昂贵且制备费时的掩模板.

通过大量实验,得到了具有较光滑平面及较好陡直度的硅基波导耦合器结构.制备完成的四环谐振腔结构如图 5(a)所示,图 5(b)为环形腔与直波导耦合区域,其中直波导与环形腔距离为 129 nm .



(a) Four-coupled ring



(b) Gap between straight waveguide and ring resonator

图 5 扫描电镜图

Fig. 5 Scanning-electron micrographs

3 实验测试与分析

采用垂直耦合法^[20]进行测试,用带有光纤输出的单模可调谐激光器($1520 \sim 1570 \text{ nm}$)作为激发微环腔回音壁模式的输入光源.偏振控制器用来控制激光束的不同偏振态,能够进一步提高其耦合效率.单模透镜光纤输入端连接偏振控制器,在输出端与硅基波导衍射光栅组成垂直耦合系统,将光场耦合到直波导中,经光波导传输到出射端,再通过同样的光栅结构将输出光场耦合回接收的单模透镜光纤中,输出光信号经光电探测器接收后由示波器显示输出信号.实验装置如图 6.

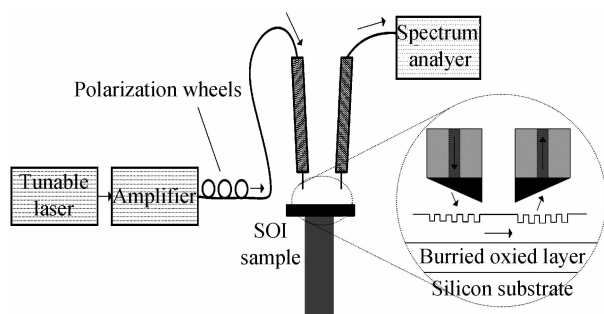


图 6 测量平台

Fig. 6 Measurement platform

品质因数(Q)是衡量谐振腔质量的重要参量之一, 反应了谐振腔存储能量以及对频率选择的能力. 利用线宽法可以简单地表示为

$$Q = \omega\tau = 2\pi f_0 \frac{W}{dW/dt} = f_0/\Delta f \quad (13)$$

式中, ω 为入射光角频率, τ 为光子的存储时间, f_0 为谐振峰值对应的频率, Δf 是微腔透射谱的半高全宽. 单环和四环谐振腔结构下载端 TE 模式透射谱线如图 7. 可以得到单环谐振腔结构透射谱半高全宽为 0.054 nm, 对应的品质因数 $Q=2.810^4$. 四环谐振腔结构产生了两个透射峰, 其中一个透射谱半高全宽为 0.022 nm, 对应的品质因数 $Q=0.7210^5$, 且两个谐振峰之间的距离相隔 0.084 nm.

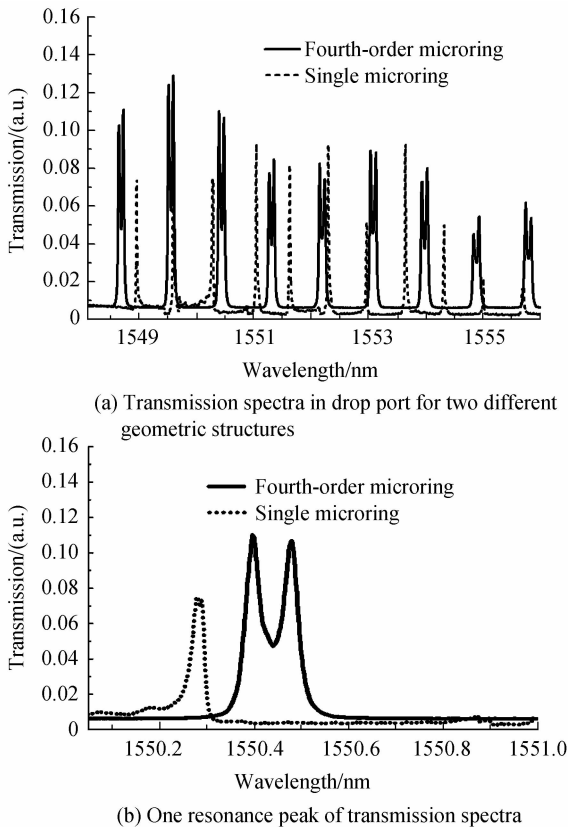
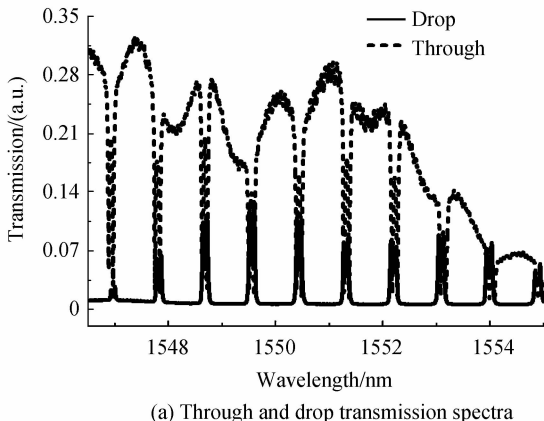
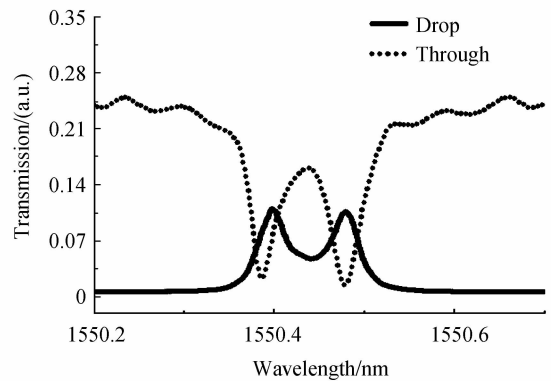


图 7 单环腔与四环腔结构传输谱线对比图
Fig. 7 Transmission spectra for two different structures



(a) Through and drop transmission spectra



(b) One resonator dip and peak of spectra

图 8 四环谐振腔透射光谱

Fig. 8 Transmission spectra for four-ring resonators

该四环谐振腔结构提供了一种实现基于高 Q 值耦合诱导透明现象的方法. 每个环形腔之间相互干涉作用, 得到了两个透射峰, 如图 8, 从而实现了对光传输的延迟. 从图中可以看出直通端与下载端谐振谱线有较好的一致性.

4 结论

设计了一种四环谐振腔结构, 并对其透过系数和有效相移进行了理论分析. 实验得到其品质因数为 0.721×10^5 , 验证了耦合诱导透明效应, 两个谐振峰之间的距离相隔 0.084 nm. 与现有研究相比, 该结构能够在保证较高品质因数的基础上获得透明效应, 且环形腔的半径相同, 可以大大降低对设计和工艺过程的要求, 对硅基传感领域的应用具有一定价值.

参考文献

- [1] ZHANG Shuang, GENOV D A, WANG Yuan, *et al.* Plasmon-induced transparency in metamaterials [J]. *Physical Review Letters*, 2008, **101**: 047401.
- [2] XU Q, SOREF R. Reconfigurable optical directed-logic circuits using microresonator-based optical switches [J]. *Optics Express*, 2011, **19**(6): 5244-5259.
- [3] HEEBNER, JOHN E, ROBERT W Boyd, *et al.* Slow light, induced dispersion, enhanced nonlinearity, and optical solitons in a resonator-array waveguide [J]. *Physical Review-Series E*, 2002, **65**(3; PART 2A): 036619.
- [4] SMITH D D, CHANG H, FULLER K A, *et al.* Coupled-resonator-induced transparency [J]. *Physical Review A*, 2004, **69**(6): 063804.
- [5] TOTSUKA K, NORIHIKO K, MAKOTO T. Slow light in coupled-resonator-induced transparency [J]. *Physical Review Letters*. 2007, **98**(21): 213904.
- [6] WURTZ G A, POLLARD R, ZAYATS A V. Optical bistability in nonlinear surface-plasmon polaritonic crystal [J]. *Physical Review Letters*, 2006, **97**(5): 057402.
- [7] LU Hua, LIU Xue-ming, WANG Lei-ran, *et al.* Ultrafast all-optical switching in nanoplasmonic waveguide with Kerr nonlinear resonator [J]. *Optics Express*, 2011, **19**(4): 2910-2915.
- [8] MALEKI L, MATSKO A B, SAVCHENKOV A A. Tunable delay line with interacting whispering-gallery-mode resonators

- [J]. *Optics Letters*, 2004, **29**(6): 626-628.
- [9] POON J K S, SCHEUER J, XU Y, *et al.* Designing coupled-resonator optical waveguide delay lines[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2004, **21**(9): 1665-1673.
- [10] TOTSUKA K, KOBSYSDHI N, TOMITA M. Slow light in coupled-resonator-induced transparency[J]. *Physical Review Letters*, 2007, **98**(21): 213904.
- [11] YANIK M F, FAN S. Stopping light all optically [J]. *Physical Review Letters*, 2004, **92**(8): 083901.
- [12] HONG Ling-fei, ZHANG Chun-xi, FENG Li-shuang, *et al.* Frequency tracking and locking methods in resonator micro-optic gyro[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, **38**(9): 103-107.
洪灵菲, 张春熹, 冯丽爽, 等. 谐振式微光学陀螺频率跟踪与锁定技术研究[J]. *中国激光*, 2011, **38**(9): 103-107.
- [13] RAFAEL Q T, NAVARRO M, ACKERMAN M, *et al.* Scatterometer using a bidirectional ring laser [J]. *Optics Communications*, 2004, **241**(1): 179-183.
- [14] THOMAS N, LEOSON K, BOZHEVOLNYI S I. Surface plasmon polariton based modulators and switches operating at telecom wavelengths[J]. *Applied Physics Letters*, 2004, **85**(24): 5833-5835.
- [15] XU Qian-fan, SHAKYA J, LIPSON M. Direct measurement of tunable optical delays on chip analogue to electromagnetically induced transparency [J]. *Optics Express*, 2006, **14**(14): 6463-6468.
- [16] XU Qian-fan, PO Dong, LIPSON M. Breaking the delay-bandwidth limit in a photonic structure[J]. *Nature Physics*, 2007, **3**(6): 406-410.
- [17] WEI Li-ping, WANG Yong-hua, ZANG Jun-bin, *et al.* Analysis and optimum design of silicon-on-insulator micro-ring resonator electro-optic modulator[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(12): 1473-1477.
韦丽萍, 王永华, 臧俊斌, 等. 绝缘体上硅微环谐振腔电光调制器的分析与最优设计[J]. *光子学报*, 2013, **42**(12): 1473-1477.
- [18] ZHANG Xiao-kang, LIAO Chang-jun, LIU Song-hao. The relationship between bending radius and bending loss[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(2): 147-150.
张小康, 廖常俊, 刘颂豪. 波导弯曲半径与弯曲损耗的关系[J]. *光子学报*, 2004, **33**(2): 147-150.
- [19] ZHANG Jing-hua. Effect of loss on output phase differences of optical fiber couplers[J]. *Optical Fiber & Electric Cable*, 1999, **6**: 17-21.
张靖华. 损耗对光纤耦合器输出相位差的影响[J]. *光纤与电缆及其应用技术*, 1999, **6**: 17-21.
- [20] ZHAO Jian-lin, LI Bi-li, YANG De-xing, *et al.* Experiment of light writing planar waveguides array in LiNbO₃: Fe crystal[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(4): 421-424.
赵建林, 李碧丽, 杨德兴, 等. LiNbO₃: Fe 晶体中光写入阵列平面光波导的实验实现[J]. *光子学报*, 2003, **32**(4): 421-424.